Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrimiento

• Bertha Meza-Prieto* • Javier Aparicio •
Universidad Nacional Autónoma de México, Jiutepec, México
*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-05

Resumen

Meza-Prieto. B., & Aparicio, J. (enero-febrero, 2018). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrimiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *9*(1), 69-87, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-05.

Una manera de impulsar proyectos con base en energías renovables, como los sistemas hidroeléctricos a pequeña escala, es determinando los lugares viables para el emplazamiento de dichos proyectos y la energía que podría explotarse. En este trabajo se expone un método de sencilla aplicación para estimar el potencial hidroenergético en cuencas hidrológicas. La bondad principal del método se debe al empleo de *software* libre para la modelación hidrológica continua. Se utiliza el *software ArcGis 10.1* para realizar la delimitación y el procesamiento cartográfico de las subcuencas hidrológicas y el trazo de perfiles longitudinales de cauces. Los criterios establecidos para la selección de sitios disponibles fueron los siguientes: pendiente del río de al menos 3% y el desnivel topográfico de tres metros o más. Se elige un periodo común de precipitación y caudal medio diario para calibrar y validar el modelo hidrológico semidistribuido *Soil Moisture Accounting* (*SMA*). El método *SMA* es una herramienta adecuada para conocer el caudal medio en cuencas no aforadas. Se encontraron 578 sitios con un potencial hidroenergético bruto de 49.2 MW. La metodología empleada es práctica, porque requiere conocimientos básicos de sistemas de información geográfica y del manejo de *HEC-HMS*. La evaluación económica muestra inversiones iniciales de $3,672,636.00 pesos mexicanos en promedio. Ante tales costos, puede ser factible invertir, si se considera una planeación a largo plazo. El Q_{90} es una buena alternativa para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas al hilo de agua.

Palabras clave: potencial hidroenergético, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs), modelo *Soil Moisture Accounting (SMA)*, curva de duración de caudales, río Alto Amacuzac.

Abstract

Meza-Prieto. B., & Aparicio, J. (January-February, 2018). Evaluation of small-scale hydropower potential in watersheds using a rainfall-runoff model. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 9(1), pp. 69-87, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-05.*

One way of promoting renewable energy-based projects, such as the small-scale hydroelectric systems, is to determine viable placements for them, as well as the exploitable energy. This work presents a simple method to estimate the hydropower potential in watersheds. The main advantage of this method is that the continuous hydrological modeling is performed using free software. The delimitation and cartographic processing of the sub basins, as well as the longitudinal profile tracing of the riverbed is performed using the Arcgis 10.1 software. The criteria for the available sites selection were established as: river slope of at least 3%, and vertical drop of 3 meters or more. A common precipitation and average daily flow period is chosen in order to calibrate and validate the Soil Moisture Accounting (SMA) semi-distributed hydrological model. The SMA method is a suitable tool to estimate the mean streamflow in ungauged watersheds. In the Alto Amacuzac River Basin, 578 sites with a gross hydropower potential of 49.2 MW were found. The methodology used is practical because it only needs basic knowledge of geographic information systems and uses HEC-HMS. The economical evaluation shows initial investments of $3,672,636.00 Mexican pesos on average. With these costs, investments may be feasible as long as a long-term plan is considered. The streamflow Q_{90} is a good alternative to design run-of-river small hydropower plants.

***Keywords**: hydropower potential, small hydropower plants, Soil Moisture Accounting (SMA) model, flow-duration curve, Alto Amacuzac River.*

Recibido: 09/02/2017
Aceptado: 07/09/2017

Introducción

La generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala es una actividad de gran importancia en el mundo y se ha practicado desde hace más de doscientos años (Fritz, 1984). Además de ser ecológicamente más conveniente (Castro, 2006; APER, 2007), las ventajas económicas de las hidroeléctricas sobre los sistemas de energía térmica son muy considerables, pues el costo de generación es menor comparado tanto con los sistemas de generación eléctrica nuclear como con los que funcionan a partir de combustibles fósiles, como diésel y gas natural (Calderón, 2017).

Una alternativa para las plantas de generación hidroeléctrica a pequeña escala son las construidas al hilo del agua, pues su impacto ambiental es despreciable, comparado con las grandes centrales, las cuales se caracterizan por generar energía de base a todas horas, aunque tienen una carga constante con limitada adaptación a la demanda de energía y no permiten regular las inundaciones ni la variación del flujo en el río (Ortiz, 2011).

El potencial eléctrico de pequeñas y micro centrales hidroeléctricas ha sido evaluado en países como Estados Unidos y Brasil. En Estados Unidos se tiene un potencial de energía total bruto anual en este tipo de centrales de cerca de 171 055 MW, pero sólo están disponibles 101 341 MW. En el caso de Brasil, se estimó un potencial para pequeñas centrales hidroeléctricas de 237 870 MW, de los cuales 4 822 se encuentran en sitios ya desarrollados y 50 231 están en áreas de exclusión, y por tanto sólo pueden utilizarse 182 817 MW (Hall, 2011).

De acuerdo con Alemán *et al*. (2014), en México existen algunas barreras para el desarrollo de energías renovables, entre las que se pueden mencionar: la estrategia energética, que se basa en la evaluación de los recursos de energía renovable a corto plazo y no a largo plazo; la tecnología, por la insuficiente inversión en la exploración de los recursos de energía renovable que no han sido considerados, como los de energía geotérmica y la undimotriz, y en el incremento de la capacidad de transmisión en áreas con alto potencial de recursos de energía renovable; y los incentivos, pues si bien la Comisión Reguladora de Energía (CRE), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Secretaría de Energía (Sener) de México los ofrecen para estimular la participación del sector privado en la generación de energía de recursos renovables, ello no es suficiente para el desarrollo de todos los esquemas de generación eléctrica.

Por otro lado, la generación por medio de pequeñas hidroeléctricas enfrenta otras barreras, como la falta de evaluación confiable del potencial de generación y la incertidumbre debida a la escasez de información meteorológica e hidrométrica adecuada. Aunado a esto, existe otra limitante en el aprovechamiento de agua para generar electricidad debido a que México tiene grandes zonas áridas y esto lo hace vulnerable a las sequías, según la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2011) por las razones siguientes: a) hay periodos de tiempo en los que disminuye la producción de energía hidroeléctrica por falta de agua; b) el régimen de lluvias sufre alteraciones tanto espaciales como temporales; c) la evapotranspiración se incrementa en los meses de marzo a junio, y d) se deben satisfacer las demandas de agua potable y riego antes que las de energía.

En el caso de generación a gran escala, los sitios aprovechables son limitados en número y éstos no necesariamente serán rentables a largo plazo debido al cambio climático, que producirá una variación temporal en el régimen de lluvias en verano; en efecto, la precipitación podría disminuir en toda la república hasta en 6% en primavera-verano en el periodo 2015-2039 de acuerdo con el escenario RCP4.5 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IMTA, 2015). Por ello, para usar la energía hidroeléctrica en el futuro, es conveniente realizar una planeación de los recursos a largo plazo, considerando, entre otros aspectos, la generación en pequeña escala, es decir, construyendo pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs).

El objetivo general de este trabajo es proponer un método para la estimación del potencial hidroenergético en cuencas hidrológicas y

• ISSN 0187-8336

localizar los sitios factibles para construir micro, mini y pequeñas centrales hidroeléctricas. Sus objetivos particulares son: 1) implementar, calibrar y evaluar el modelo *Soil Moisture Accounting* (*SMA*) (Bennett & Peters, 2000) como herramienta para obtener el caudal medio disponible en cuencas hidrológicas para generar energía eléctrica; 2) definir lugares apropiados en las subcuencas del río Alto Amacuzac para construir centrales hidroeléctricas al hilo de agua y calcular su potencial; y 3) realizar la evaluación de los costos aproximados de instalación de una PCH y revisar su factibilidad para un caso específico.

Metodología

Como parte de la metodología se realiza un análisis cartográfico de las subcuencas hidrológicas mediante el *software ArcGIS 10.1* (ESRI, 2017). Por otro lado se analiza la información climatológica e hidrométrica, y posteriormente se calibra y valida el modelo hidrológico *SMA* usando el *software HEC-HMS 4*. El programa *HEC-HMS* tiene varias alternativas para la simulación de eventos de lluvia de corta duración y simulación continua. Para determinar el volumen total de agua disponible para escurrimiento superficial, el programa cuenta con el modelo *Soil Moisture Accounting (SMA)* en el caso de simulación continua (USACE, 2017). En la figura 1 se muestra el diagrama que ilustra el procedimiento propuesto para evaluar el potencial hidroenergético en cuencas hidrológicas.

Análisis cartográfico

El análisis cartográfico se realizó a partir del modelo digital de terreno de escala 1:50 000, del conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000 serie IV (INEGI, 2010) y del conjunto nacional de datos vectorial edafológico, escala 1:250 000 serie II (INEGI, 2007), obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Dicho análisis consistió en determinar las características fisiográficas de las subcuencas y los perfiles longitudinales de las corrientes perennes. Se identificaron los tipos de vegetación y suelo, y los elementos de exclusión.

Determinación de las características fisiográficas de las subcuencas

El río Amacuzac es un afluente del río Balsas y se origina en las faldas del volcán Nevado

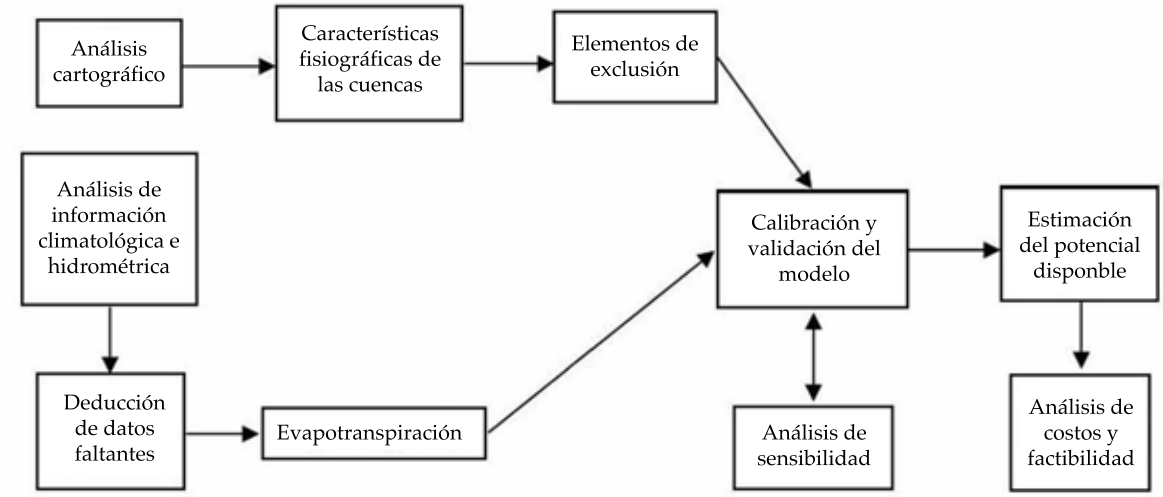

Figura 1. Procedimiento para estimar el potencial disponible y costos.

ISSN 0187-8336 •

de Toluca, a una altitud aproximada de 2 600 msnm dentro de San Martín Tequesquipan, Estado de México, en donde se le conoce como río Texcaltitlán. La longitud total del río Amacuzac hasta la confluencia con el río Balsas es de 253 km aproximadamente (IMTA, 2012). El área de estudio se encuentra ubicada en la cuenca río Alto Amacuzac, cuya superficie es de 2 611.98 km^2, dentro de la cual se encuentran los ríos principales Texcaltitlán, Chontalcuatlán y San Jerónimo (INEGI, 2017).

Se definieron los sitios propicios para construir pequeñas centrales hidroeléctricas en esta cuenca considerando los siguientes criterios: 1) la pendiente del tramo de río debe ser por lo menos de 0.03 (3 %) debido a la resolución del modelo digital de terreno; y 2) un desnivel mínimo por tramo de tres metros debido a que las turbinas comerciales funcionan con más de dos metros de carga (Ortiz, 2011). Posteriormente se delimitaron las subcuencas y se obtuvieron sus características principales, como área, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce principal y tiempo de concentración necesarias para el uso del modelo *SMA*.

Determinación de perfiles longitudinales

Se trazaron los perfiles longitudinales de las corrientes tributarias que coincidían con las corrientes perennes de las subcuencas hidrológicas (INEGI, 2017), con el fin de determinar el desnivel topográfico y la distancia horizontal del cauce, y luego calcular una pendiente media. En la figura 2 se muestra un perfil tipo obtenido con la herramienta *3D-Analyst*. Para ello se convierten los perfiles en 2D a 3D utilizando la rutina siguiente: *ArcToolbox-3D Analyst Tools-Functional Surface-Interpole Shape*.

Identificación de los tipos de vegetación y suelo

Se determinaron el tipo de vegetación y tipo de suelo en el área de estudio para definir el valor de los parámetros iniciales que dependen de las características geomorfológicas de las cuencas, tomando como base los reportados en otros trabajos. En la figura 3 se muestra el tipo de vegetación característica y uso de suelo de la cuenca Alto Amacuzac. El tipo de suelo dominante de acuerdo con la clasificación

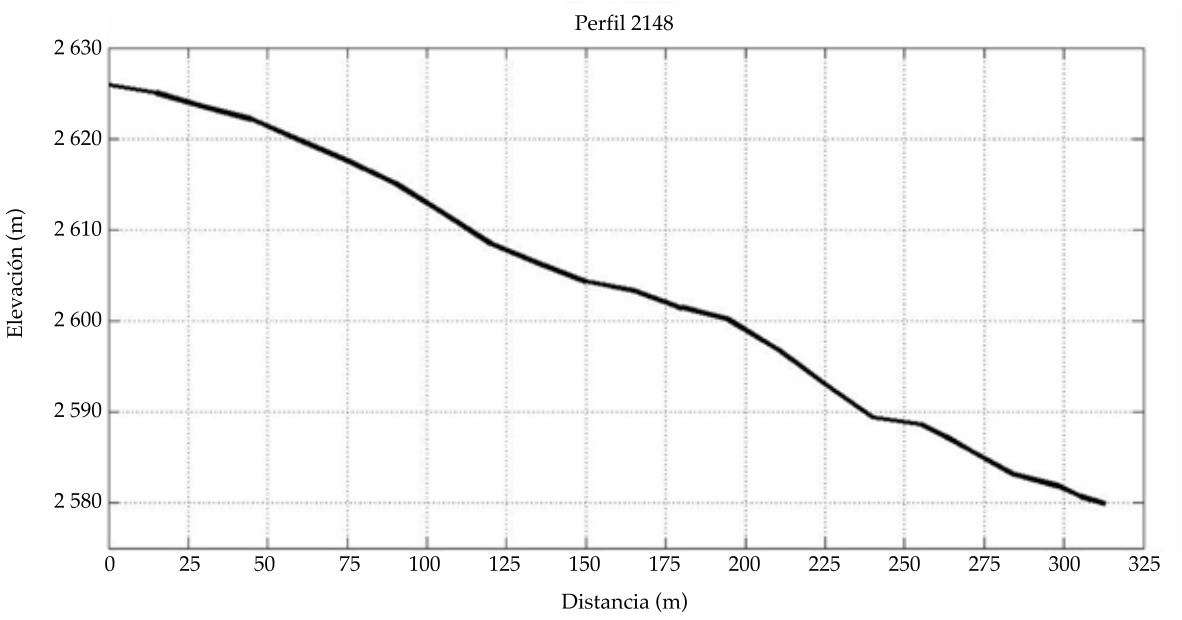

Figura 2. Perfil longitudinal del cauce principal del río Amacuzac.

• ISSN 0187-8336

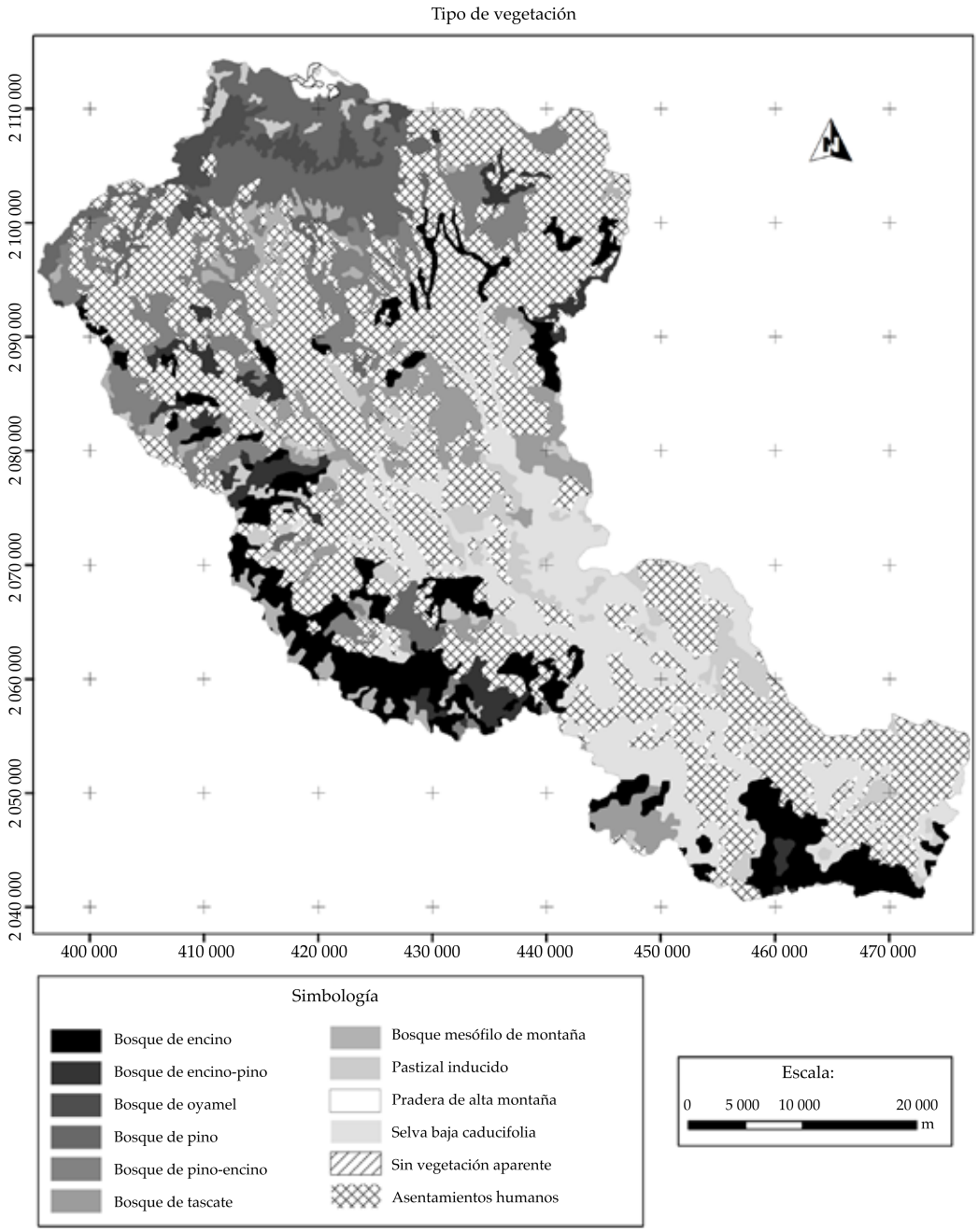

Figura 3. Tipo de vegetación y uso de suelo. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos —antes Soil Conservation Service (SCS) (Aparicio, 2010)— se obtuvo a partir de la información edafológica digital con clases de textura 1, 2 y 3 (INEGI, 2004). En la figura 4 se presenta la ubicación de los tipos de suelos principales en la cuenca Alto Amacuzac. La clase NA corresponde a las áreas donde están ubicadas las manchas urbanas.

ISSN 0187-8336 •

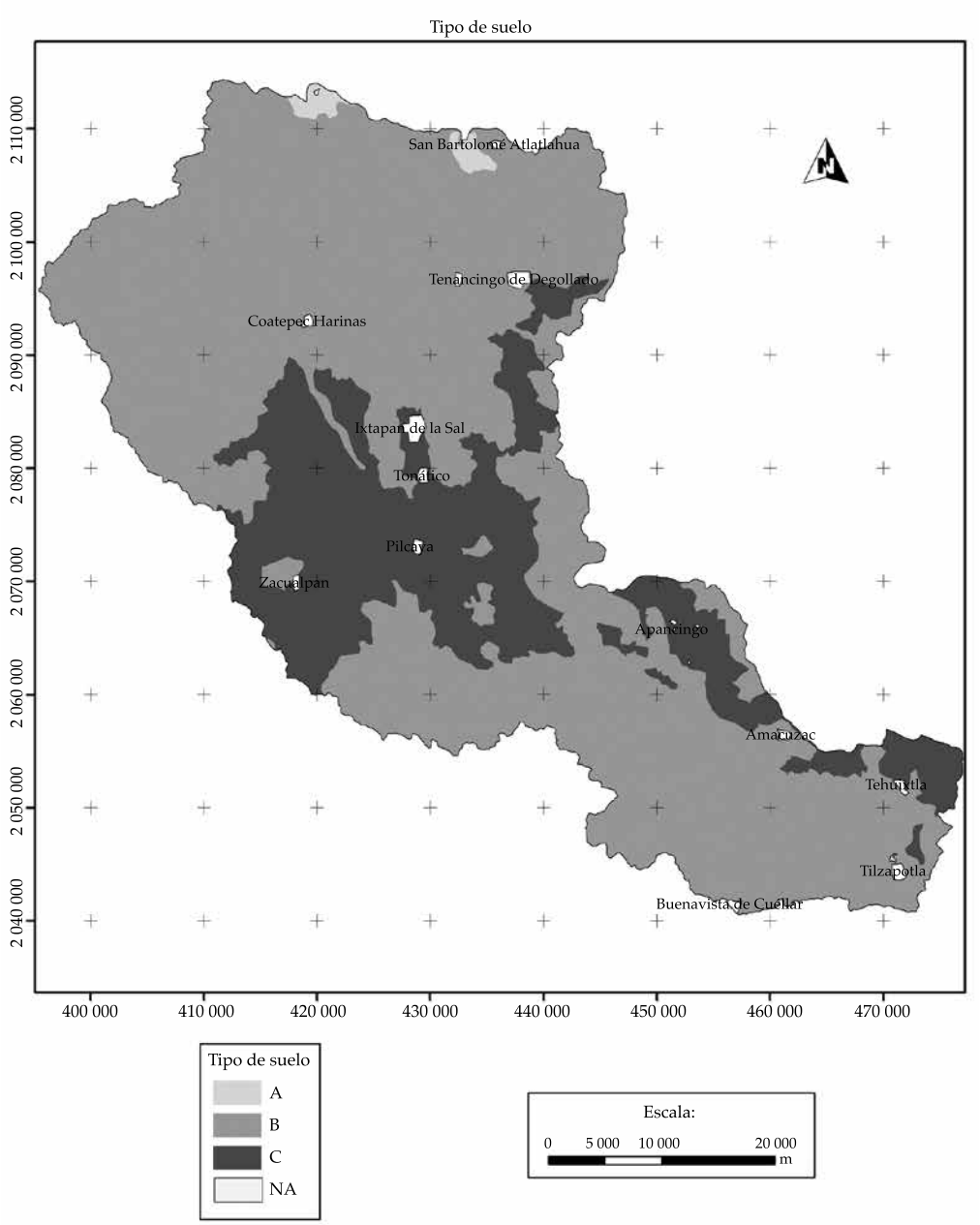

Figura 4. Tipo de suelo y área urbana. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

Ubicación de los elementos de exclusión

Como elementos de exclusión se consideran las superficies en las que no se puede aprovechar el agua para generación hidroeléctrica, por ejemplo las áreas protegidas, proyectos de obras existentes, zonas con baja precipitación y cuando el uso de suelo no lo permite, como en el caso de áreas urbanas o agrícolas. En la figura 5 se muestra el área urbana, infraestructura existente y las áreas naturales protegidas pertenecientes a los parques nacionales Nevado de Toluca y Desierto de Carmen o de Nixcongo, así como el Parque Estatal Santuario del Agua Temascaltepec, ubicados dentro de la cuenca Alto Amacuzac.

• ISSN 0187-8336

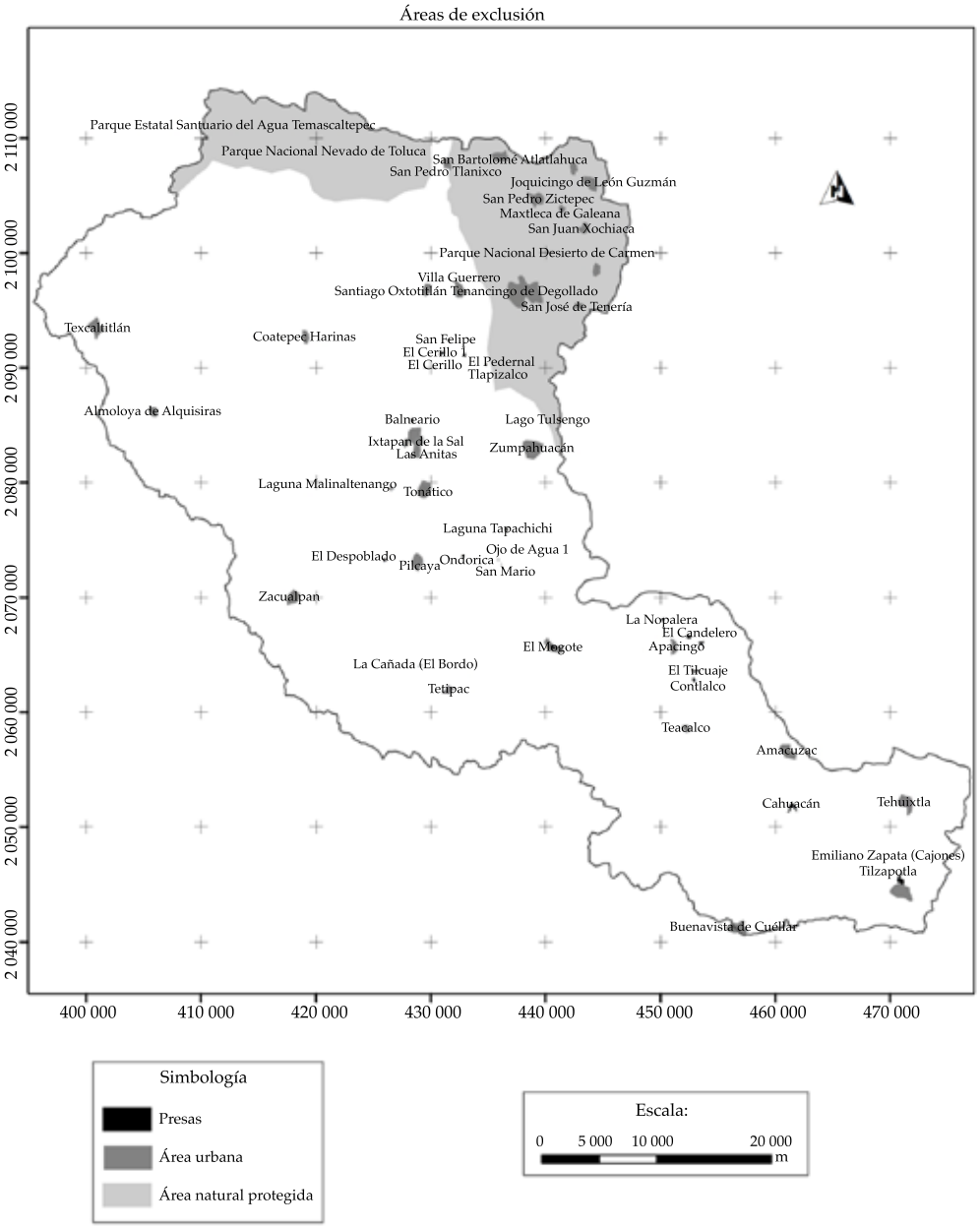

Figura 5. Ubicación de las áreas naturales protegidas y área urbana. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

Análisis de información climatológica e hidrométrica

Para realizar el análisis de la información climatológica se utilizaron los datos registrados en la base de datos climatológica nacional CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional, con información de precipitación hasta el año 2012 (Conagua, 2017). La información hidrométrica se obtuvo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas) de la Red Hidrométrica Nacional, actualizado por Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2012). Asimismo, se obtuvo la evapotranspiración mensual con el método Blaney-Criddle (Aparicio, 2010), ya que éste utiliza datos disponibles,

ISSN 0187-8336 •

como temperatura media mensual y horas de sol mensual. Se definió un periodo común de al menos 12 años de datos registrados de precipitación y caudal medio diario para usar en la calibración y validación del modelo *SMA*, pues se consideró el criterio tomado en la calibración y validación del modelo *SMA* en *HEC-HMS*, en el que se calibró el modelo con un periodo de datos de caudal de cuatro años, menor al usado en la validación de siete años.

Revisión de información climatológica

Se trazaron los polígonos de Thiessen (Aparicio, 2010) mediante el *software ArcMap* para obtener el área de influencia fija de cada estación climatológica necesaria para asignar un peso espacial a la precipitación registrada en el modelo meteorológico del *software HEC-HMS*. El uso de polígonos de Thiessen permite determinar áreas de influencia de las estaciones climatológicas para varias cuencas a la vez. Para esto se utilizaron 23 estaciones climatológicas, de las cuales cinco están ubicadas en Morelos, 14 en el Estado de México y cuatro en Guerrero. Se revisaron los datos de precipitación diaria y se dedujeron los datos faltantes para completar las series de datos históricos diarios de acuerdo con Aparicio (2010). Se encontraron más datos faltantes en el periodo 1991-2006 utilizados para realizar la validación de los parámetros en la cuenca Chontalcuatlán, pues de las nueve estaciones climatológicas, cuatro presentaron gran porosidad; por ejemplo, en Meyuca faltaban 12 meses de información diaria; en San Fco. Oxtotilpan, 20 meses; en Coatepec Harinas, 33 meses y en Nevado de Toluca faltaban nueve meses. En la estación Troja Vieja se determinaron los datos faltantes de dos meses; en Coatepequito y Dos Bocas se rellenaron dos meses de precipitación diaria, y en El Mirador un mes. En la mayoría de los casos se estimaron los datos faltantes de los meses menos lluviosos y en todos los casos se observó una correlación lógica en los datos de precipitación mensual.

Análisis de caudales medios diarios

Para hacer el análisis se emplearon cinco estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca Alto Amacuzac, sobre los cauces de los ríos Amacuzac, San Jerónimo, Chontalcuatlán y Texcaltitlán. No existen reglas generales para seleccionar los periodos de calibración y validación, pero algunos autores (*e.g.*, Bottcher, Whiteley, James, & Hiscock, 2012) recomiendan que el periodo de validación sea al menos del doble que el de calibración. En los casos de las cuencas Texcaltitlán y Chontalcuatlán se usaron cuatro años de datos históricos de caudales diarios, así como 8 y 16 años, respectivamente, para la validación; los parámetros para la cuenca Coatepequito se calibraron con cinco años y se validaron con 20 años de registros, y los parámetros para las cuencas Dos Bocas y Amacuzac se calibraron con seis años y se validaron con 16 años de registros de datos diarios. Esto se hizo con el fin de utilizar los datos de precipitación empleados en la validación de los parámetros, para hacer la simulación en las subcuencas hidrológicas, pues, como Ortiz (2011) menciona, las curvas de duración de caudales y de frecuencias se deben obtener con la información histórica existente superior a 10 años preferiblemente en el caso de PCHs.

En la figura 6 se muestra la ubicación de las estaciones climatológicas e hidrométricas utilizadas para el análisis y los polígonos de Thiessen trazados. El nombre de la cuenca hidrológica se asignó de acuerdo con el nombre de la estación hidrométrica de aforo.

Calibración y validación del modelo hidrológico

El modelo hidrológico está constituido por tres etapas de cálculo. En la primera se determina el flujo del agua de precipitación con el modelo *SMA*, ya sea que se evapotranspire, se infiltre, percole o escurra. Luego se utiliza el modelo de Clark para representar la transformación de la precipitación en exceso en escurrimiento

• ISSN 0187-8336

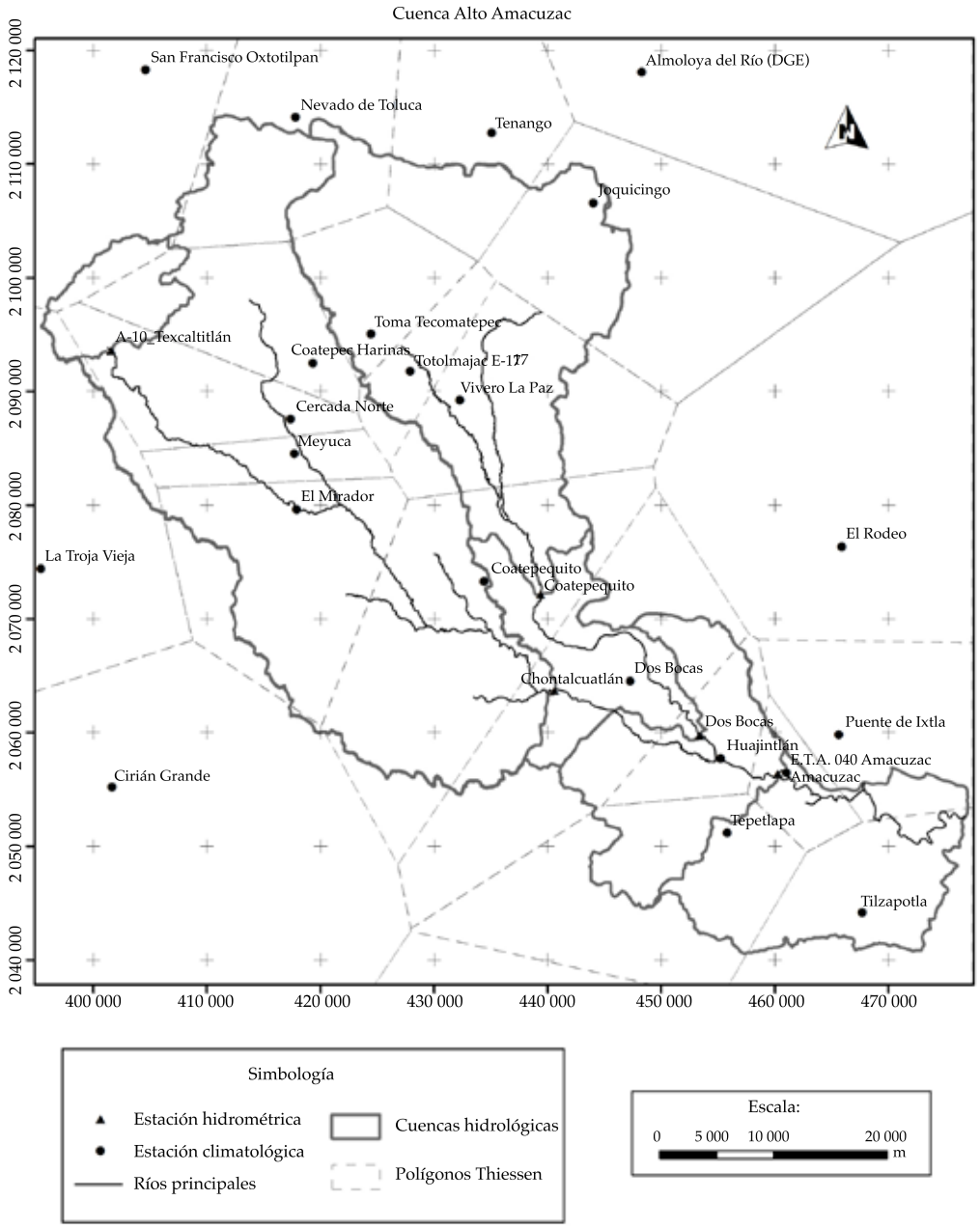

Figura 6. Ubicación de las estaciones climatológicas e hidrométricas. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI y Conagua.

superficial; finalmente se determina la contribución del flujo base en el hidrograma resultante mediante el modelo de depósitos lineales (Bennett, 1998).

En el proceso de calibración es necesario definir valores adecuados para cada parámetro; entre mayor sea el número de parámetros involucrados en cada etapa de cálculo, mayor es el grado de dificultad para obtenerlos. En este caso, para cada cuenca hidrológica se deben establecer 25 parámetros: 17 pertenecientes al modelo *SMA*, dos pertenecientes al modelo de Clark y seis pertenecientes al modelo de depósitos lineales.

ISSN 0187-8336

Se puede recurrir a varias estrategias para calibrar un modelo con varios parámetros. Si los parámetros tienen sentido físico, se establecen relaciones entre sus valores y las características geomorfológicas de las cuencas, utilizando expresiones matemáticas, tablas y rangos de valores orientativos propuestos por diferentes autores; si los parámetros no tienen sentido físico, pero dominan en ellos algunas condiciones de tipo matemático, en algunos casos hay valores que se pueden estimar por criterios subjetivos, comparándolos con los adoptados en estudios similares (Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, 2004). En este estudio se obtuvieron los parámetros a partir de las características geomorfológicas, ya que varios parámetros dependen del tipo de vegetación; la pendiente del terreno; el uso y el tipo de suelo, como es el caso de la capacidad de almacenamiento del dosel forestal y la capacidad de almacenamiento superficial en depresiones. De igual manera se determinaron los parámetros relacionados con las características del suelo (textura, porosidad y permeabilidad), como la máxima capacidad de infiltración de agua en el suelo, la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la capacidad de almacenamiento en la zona de tensión del suelo y la máxima capacidad de percolación.

Análisis de sensibilidad

Para realizar el análisis de sensibilidad se propusieron valores de los parámetros tomando como base los reportados en los trabajos de Bennett (1998) y el Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (2004), y se realizó la simulación en la cuenca Texcaltitlán. Después se optó por multiplicar por factores de 10 y de 0.2, cambiando uno a la vez los valores de los parámetros necesarios para realizar la simulación en el modelo *SMA*, excepto cinco valores que representan el almacenamiento en la vegetación, en superficie, en el suelo y subsuelo al inicio de la simulación, pues estos valores no afectan los resultados obtenidos cuando se hace la simulación continua de varios años (Bennett, 1998).

Calibración del modelo

Para realizar la calibración se optimizaron los parámetros, utilizando las funciones objetivo "suma de errores absolutos", "suma de residuos cuadrados", "error porcentual en pico", "error cuadrático medio de la raíz del pico-ponderado" y "error porcentual en volumen" (USACE, 2017). Debido a que en este caso interesa conocer el caudal de escurrimiento diario en las subcuencas, se consideró como criterio de aceptación un error menor de 10% entre los volúmenes observado y simulado.

Validación del modelo

Para determinar la bondad de ajuste del modelo hidrológico se usa el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970). Según Moriasi *et al*. (2007), los valores del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe entre 0 y 1 son aceptables, y el óptimo es el valor 1, mientras que un valor menor que 0 indica que la media de los valores observados es un mejor predictor que el modelo.

Estimación del potencial disponible

Para cada sitio se determinó la curva de duración de caudales utilizando los datos obtenidos de caudal medio con el modelo calibrado en *HEC-HMS*. De la curva de duración de caudales se obtuvo el caudal mínimo que se puede asegurar con alta probabilidad, normalmente entre 85 y 95%. En este trabajo se utiliza el $Q_{90,}$ es decir, el caudal que se encuentra en el río el 90% del año (UTP, 2010; Ayros & Salazar, 2011). Posteriormente se calculó la potencia hidráulica bruta utilizando la ecuación:

$$P = 9.81QH \qquad (1)$$

donde P es la potencia bruta en kW, Q es el caudal en m^3/s y H es la carga de presión debida

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IX, núm. 1, enero-febrero de 2018, pp. 69-87
• ISSN 0187-8336

a la energía potencial en m, que en este caso es el desnivel topográfico (Ortiz, 2011).

Análisis de costos

El costo del kilowatt instalado es variable aun en centrales diseñadas con la misma potencia, pues depende de las condiciones propias del sitio y de las características técnicas del proyecto. Con el fin de conocer el costo aproximado de la inversión que se realizaría al llevar los sitios disponibles a las siguientes etapas de planeación y construcción de las PCHs, se hizo la evaluación de los sitios disponibles utilizando información del costo por kilowatt instalado (en euros) reportado en Ortiz (2011), aunque en algunos países puede variar el costo debido a factores como el transporte y la importación de los equipos. El costo de instalación de la PCH depende naturalmente de la caída y la potencia, y las centrales con potencia menor de 250 kW son más costosas por unidad de potencia, como se puede observar en la figura 7.

Se estimó el costo de cada PCH y la energía generada anualmente, considerando la eficiencia del grupo turbina-generador de 80%, pues se consideran turbinas hidráulicas tipo Michell Banki (Ortiz, 2011) de admisión parcial, por ser de bajo costo y ser adecuadas para desniveles bajos, además de ser muy estables de 1/3 a 3/3 de carga.

Los egresos anuales por los costos de operación anual, reparación y mantenimiento anual de la planta e insumos para administración anual fueron considerados como el 3.5% del costo por kilowatt instalado de acuerdo con la distribución porcentual de los costos de construcción de una PCH (Ortiz, 2011). El ingreso anual es por concepto de la venta de energía a un costo promedio de $1.45 por kWh, obtenido con los costos del consumo básico, intermedio y excedente de las tarifas domésticas 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F en temporada de verano y fuera de verano, que varían en el rango de $1.26 a $1.52, según la Comisión Federal de Electricidad de México (CFE, 2017). Con esta información se

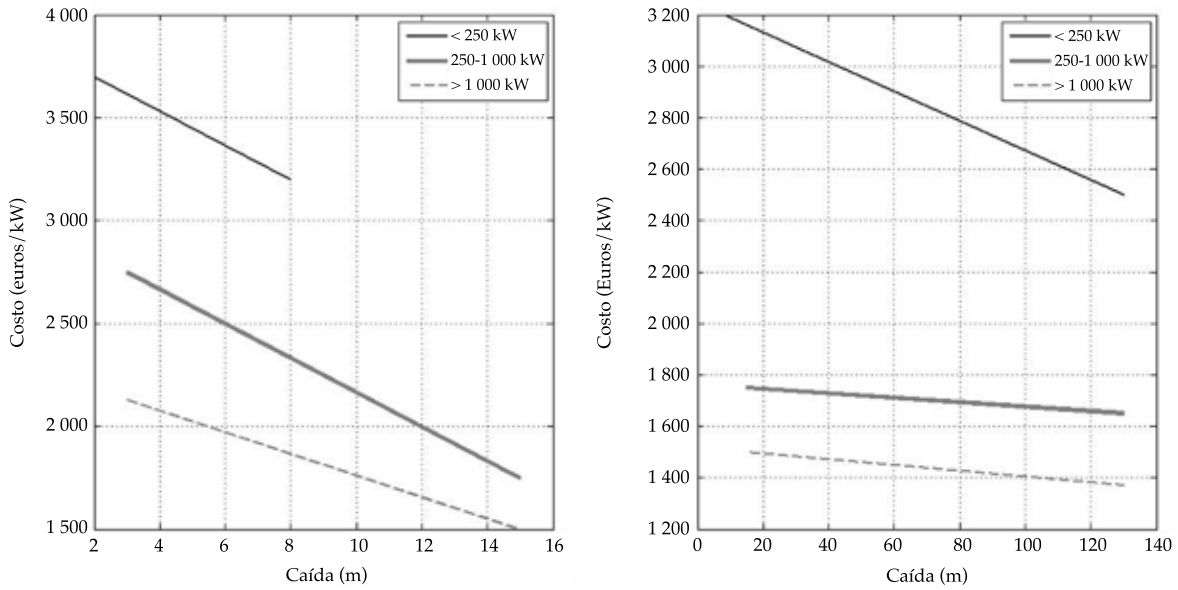

Figura 7. Costo por kilowatt instalado para PCHs (Ortiz, 2011).

ISSN 0187-8336 •

obtuvo el ingreso neto anual como la diferencia entre los egresos e ingresos anuales, información necesaria para analizar la rentabilidad de cada proyecto.

Factibilidad de una PCH al hilo de agua

Al realizar el estudio de factibilidad es difícil decidir cuál debe ser el caudal de diseño para las pequeñas centrales hidroeléctricas. Por ello, como ejemplo, se utiliza la curva de duración de caudales para determinar la viabilidad del proyecto con base en cada uno de los caudales presentes en el cauce durante el año en el sitio 351, con código 7 749, ubicado en la cuenca Chontalcuatlán. La potencia de diseño es la potencia obtenida con la carga neta, es decir, la carga bruta o disponible menos las pérdidas en la tubería. La potencia mínima es la potencia a la cual funciona la turbina de manera aceptable; en este caso, dicha potencia se obtiene con el 16% del gasto de diseño, de acuerdo con la curva de rendimiento que se mantiene casi horizontal entre el 16 y 100% del caudal máximo de diseño (Osserberg, 2017).

Se propone considerar acero inoxidable con un coeficiente de rugosidad $n = 0.014$ para determinar las pérdidas en la tubería, pues se buscó el diámetro de tubería con el que se perdiera menos de 10% de la carga disponible dada por el desnivel topográfico.

Se presentan dos criterios para determinar la rentabilidad de los proyectos: la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN). La primera es la tasa efectiva anual con la que el valor presente neto de los costos es igual al valor presente neto de los beneficios (Fernández, 2007). Para este caso se considera que la vida útil de cada proyecto es de 25 años, pues aunque la obra civil y la tubería forzada pueden tener una vida útil de unos 50 años, la vida útil de la turbina es por lo general de 35 años, y la del generador de 14 a 25 años, dependiendo de la potencia, por lo que el proyecto requeriría una nueva inversión en el generador o turbina si se sigue utilizando la pequeña central hasta los 50 años.

Resultados y discusión

Calibración y validación del modelo hidrológico

Análisis de sensibilidad

Del análisis de sensibilidad se definió que la capacidad de almacenamiento del suelo (*soil capacity*); la capacidad del almacenamiento en la zona de tensión del suelo (*tension zone capacity*); la capacidad de almacenamiento del depósito subterráneo #1 (*groundwater 1 storage coefficient*); la capacidad de almacenamiento del depósito subterráneo #2 (*groundwater 2 storage coefficient*); la máxima capacidad de percolación del depósito subterráneo #2 (*groundwater 2 percolation rate*), y los coeficientes de almacenamiento del depósito subterráneo # 1 y # 2 (*groundwater 1 storage coefficient* y *groundwater 2 storage coefficient*) son los parámetros que más influyen en la variabilidad del caudal obtenido en la simulación, por lo que se debe poner especial atención al proponer los valores iniciales de estos parámetros para calibrar del modelo.

Calibración del modelo

Al realizar la simulación con las diferentes funciones objetivo se observó mayor similitud entre los hidrogramas medido y simulado con la función "error porcentual en volumen". También se advirtió que el modelo tiende a establecerse con el primer evento de lluvia y puede modelar con cierta precisión desde un año de datos continuos, por lo que se puede deducir que no hay gran diferencia si se utiliza un periodo menor de datos en la calibración o en la validación. Los parámetros optimizados obtenidos en el proceso de calibración se muestran en el cuadro 1.

Validación del modelo

Al determinar la eficiencia del modelo para simular el volumen acumulado bajo el hidrograma se encontraron muy buenos resultados, pues el coeficiente de Nash-Sutcliffe fue de 0.9 o

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IX, núm. 1, enero-febrero de 2018, pp. 69-87
• ISSN 0187-8336

Cuadro 1. Parámetros optimizados para cada una de las cuencas hidrológicas.

Núm.	Parámetro	Unidades	Texcaltitlan	Coatepequito	Chontalcuatlán	Dos Bocas	Amacuzac
1	*Canopy Capacity*	mm	1.609	1.174	1.063	1.155	1.154
2	*Canopy Initial Storage Percentage*	%	0.100	0.228	0.147	0.136	0.175
3	*Clark Storage Coefficient*	h	846.090	780.060	780.100	780.020	780.070
4	*Clark Time of Concentration*	h	2.110	5.980	8.210	10.100	11.130
5	*Groundwater 1 Capacity*	mm	20.121	45.073	54.988	55.124	55.162
6	*Groundwater 1 Initial Storage Percentage*	%	0.102	0.254	0.205	0.418	0.188
7	*Groundwater 1 Percolation Rate*	mm/h	0.734	0.631	0.907	1.106	0.873
8	*Groundwater 1 Storage Coefficient*	h	3 300.100	6 000.100	7 000.100	7 000.000	7 000.100
9	*Groundwater 2 Capacity*	mm	16.651	38.063	50.138	50.000	50.167
10	*Groundwater 2 Initial Storage Percentage*	%	0.102	0.253	0.197	0.084	0.183
11	*Groundwater 2 Percolation Rate*	mm/h	2.118	1.566	0.918	0.894	0.721
12	*Groundwater 2 Storage Coefficient*	h	3 522.100	4 750.100	5 999.700	6 000.000	6 000.200
13	*Linear Reservoir GW 1 Coefficient*	h	3 300.100	6 000.100	7 000.000	6 999.900	7 000.000
14	*Linear Reservoir GW 1 Steps*		2	15	18	28	30
15	*Linear Reservoir GW 2 Coefficient*	h	3 522.100	4 750.100	6 000.100	6 000.000	6000.200
16	*Linear Reservoir GW 2 Steps*		2	15	18	28	30
17	*Soil Capacity*	mm	2.613	2.874	2.090	2.184	2.175
18	*Soil Infiltration Rate*	mm/h	2.266	1.463	0.769	1.186	0.839
19	*Soil Initial Storage Percentage*	%	0.089	0.248	0.151	0.173	0.190
20	*Soil Percolation Rate*	mm/h	0.531	0.445	1.111	0.755	0.689
21	*Surface Capacity*	mm	1.127	1.152	1.075	1.190	1.153
22	*Surface Initial Storage Percentage*	%	0.096	0.230	0.144	0.122	0.162
23	*Tension Zone Capacity*	mm	0.541	0.749	0.574	0.606	0.647

mayor en todas las cuencas hidrológicas, como se puede observar en el cuadro 2, mientras que para el caudal pico simulado, el modelo no es tan eficiente, pues el caudal pico simulado representa menos de 50% del caudal pico observado en las cinco cuencas. Sin embargo, el modelo es eficiente al representar los caudales medios diarios en un periodo de simulación de ocho años para la cuenca Texcaltitlán, 20 años para Coatepequito y 16 años para las cuencas Chontalcuatlán, Dos Bocas y Amacuzac, pues se observan valores entre "satisfactorio" y "adecuado" (Moriasi *et al*., 2007).

Debido al carácter de este trabajo, es más importante representar adecuadamente los volúmenes escurridos y los caudales medios diarios que los gastos pico. En la figura 8 se muestran los resultados de la validación de los parámetros para la cuenca Amacuzac.

Estimación del potencial disponible

En las 578 curvas de duración de caudales, los valores de Q_{90} variaron entre 0.020 y 3.76 m^3/s para obtener el potencial bruto disponible. En la figura 9 se muestran curvas tipo seleccionadas al azar de las cuencas Texcaltitlán, Coatepequito, Chontalcuatlán y Dos Bocas.

Se encontró que el potencial hidroenergético total de la cuenca Alto Amacuzac es de 49 227 kW distribuido en 578 sitios, de los cuales 575 tienen un potencial menor de 1 MW. En

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 2. Eficiencia del modelo para simular el volumen acumulado, caudal pico y el caudal medio diario.

	Volumen acumulado		Caudal pico		Caudal medio diario	
Cuenca	**Nash-Sutcliffe**	**Ajuste**	**Caudal pico observado (m^3/s)**	**Caudal pico simulado (m^3/s)**	**Nash-Sutcliffe**	**Ajuste**
Texcaltitlán	0.92	Muy bueno	26.3	7.5	0.610	Adecuado
Coatepequito	0.95	Muy bueno	101.4	42.1	0.614	Adecuado
Chontalcuatlán	0.89	Muy bueno	154.2	70.3	0.397	Satisfactorio
Dos Bocas	0.98	Muy bueno	236.2	101.9	0.562	Adecuado
Amacuzac	0.96	Muy bueno	506.6	147.3	0.518	Satisfactorio

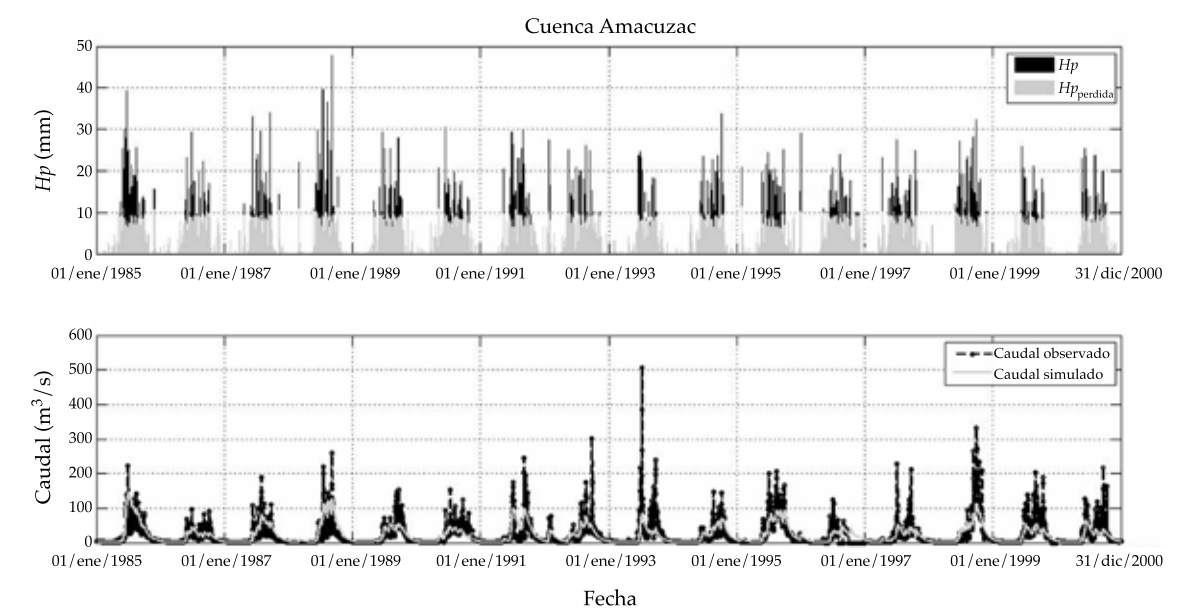

Figura 8. Hidrograma obtenido para la cuenca Amacuzac, periodo de validación.

el cuadro 3 se muestran las coordenadas de localización de algunos sitios disponibles; el desnivel o carga bruta, y la distancia horizontal en el tramo considerado; la pendiente media del tramo; el área de aportación al sitio elegido; el caudal presente en el cauce el 90% de año, y la potencia bruta disponible en los sitios elegidos. Dentro de los sitios localizados, el que tiene el potencial máximo es de 1 831.07 kW y el de menor potencial es de 1.43 kW.

En la figura 10 se presenta un mapa con la distribución de los sitios, resaltando el potencial disponible por zonas de acuerdo con la ubicación de los ríos y arroyos respecto al área urbana: El Chiquihuitero hasta el río de las Flores, Chiltepec y Palo Seco al norte de Texcaltitlán; Los Capulines en las localidades de Las Vueltas y Pachuquilla; Yerbabuena y El Cristo al oeste del poblado La Unión Riva Palacios; arroyo Florido (segunda sección), Ayatuxco, Arroyo Santiago y río El Alacrán cerca de Zacualpan; Acevedocla y San José cerca de la localidad Poder de Dios y el municipio de Tetipac; arroyo Los Tizantes, arroyo San Gaspar y río San Mateo al Norte de Totolmajac; arroyo Los Cuervos, arroyo Tintojo

• ISSN 0187-8336

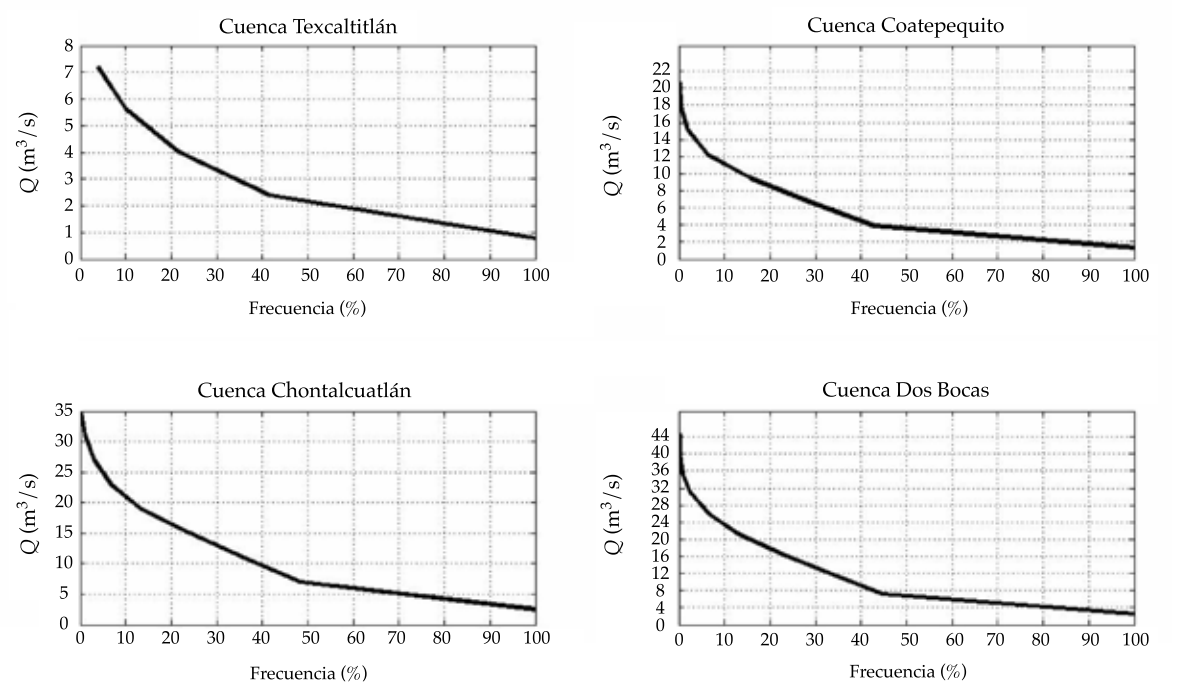

Figura 9. Curvas de duración de caudales tipo en las cuencas hidrológicas.

Cuadro 3. Características de algunos de los sitios localizados.

Sitio	Código	Desnivel (m)	Distancia (m)	Pendiente Media	Área de cuenca (km²)	*Q* (m³/s)	Potencia bruta (kW)	Coordenada UTM *Y*	Coordenada UTM *X*
11	398	13.40	235.25	0.057	673.669	2.920	383.716	2072913.4713	439454.0853
70	1554	68.68	957.68	0.072	160.969	0.900	606.385	2095089.0081	414668.9933
98	2132	53.54	906.60	0.059	145.287	1.000	525.272	2096156.0088	414810.9941
151	3397	15.96	423.66	0.038	8.745	0.071	11.119	2097854.0075	427506.9935
351	7749	8.97	298.70	0.030	829.408	3.750	329.934	2069017.0080	432938.9936
470	10489	133.32	4 373.31	0.030	177.529	1.400	1 831.073	2090010.0087	414803.9927

y arroyo Grande aguas abajo de San Pedro Tlanixco; Granadas, Zacapalco y Tlahuichia al sur de Teacalco; y San Jerónimo al sur de Zumpahuacán.

Análisis de costos

En este estudio se encontraron 534 sitios con potencia bruta menor de 250 kW, 41 sitios con potencia entre 250 y 1 000 kW, y tres con potencia mayor a 1 000 kW. El costo (pesos mexicanos) más elevado fue de $43,781,104.00 para el sitio con una potencia bruta de 1 831.1 kW, con caída de 133.32 metros y caudal de 1.4 m³/s, y el mínimo de $86,357.00, correspondiente a un sitio con caída bruta de 7.36 metros y potencia bruta de 1.52 kW. Se determinó que el costo total promedio de una PCH es de $3,672,636.00 y el costo por kW instalado es $52,865.00 en promedio.

ISSN 0187-8336 •

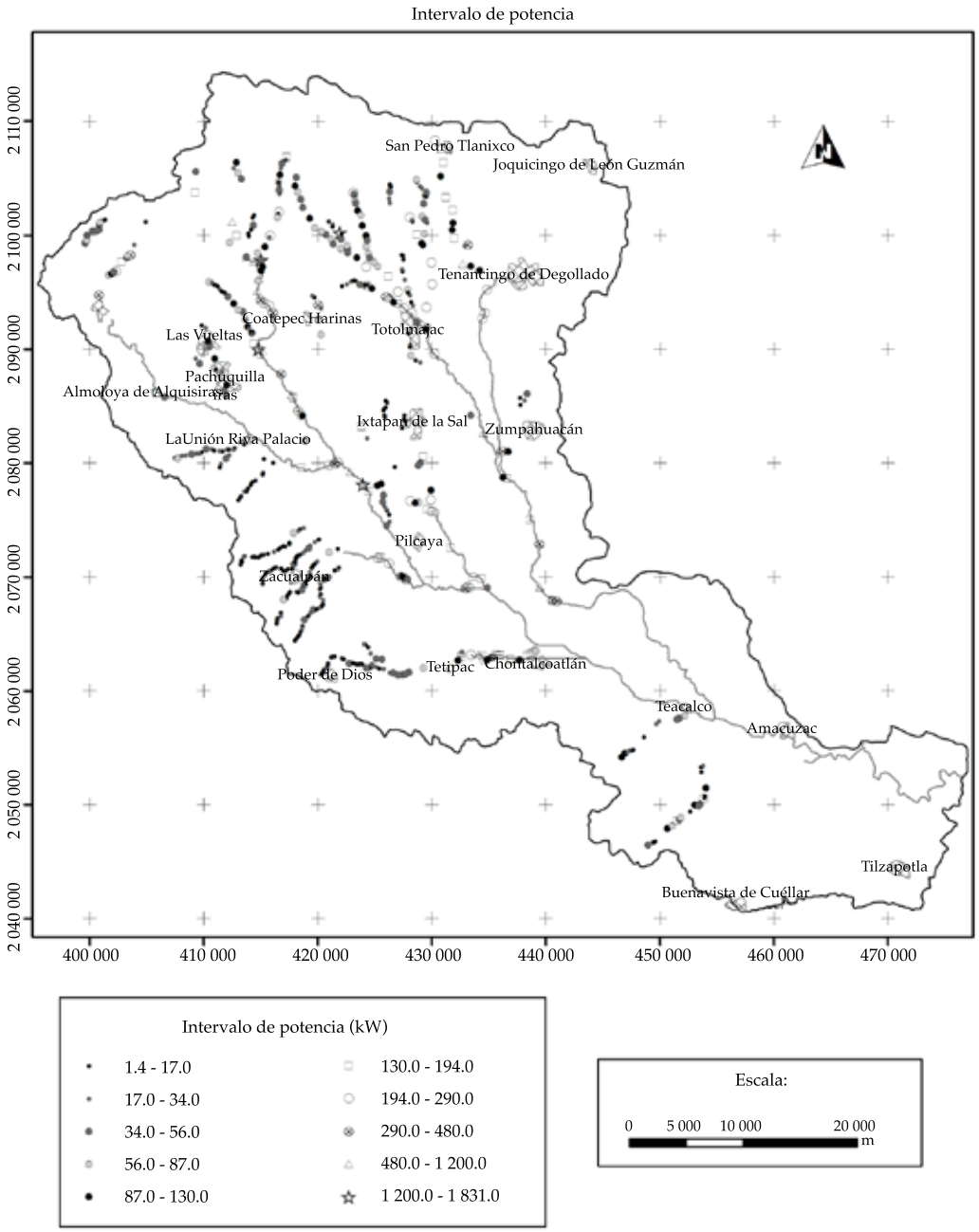

Figura 10. Distribución de los sitios con potencial micro y mini hidroeléctrico.

Factibilidad de una PCH al hilo de agua

Como resultado del análisis de factibilidad se obtuvo que el diseño usando el Q_{90} es el más conveniente y se obtendría mayor beneficio por la inversión de acuerdo con la TIR, pero el valor presente neto indica que el proyecto que aporta mayores ganancias es el obtenido al realizar el proyecto con un caudal de diseño igual a Q_{30} como se puede observar en la figura 11. Sin embargo, dado que se busca que la planta funcione la mayor parte del tiempo posible, se considera que el Q_{90} es apropiado para el diseño de plantas al hilo del agua.

• ISSN 0187-8336

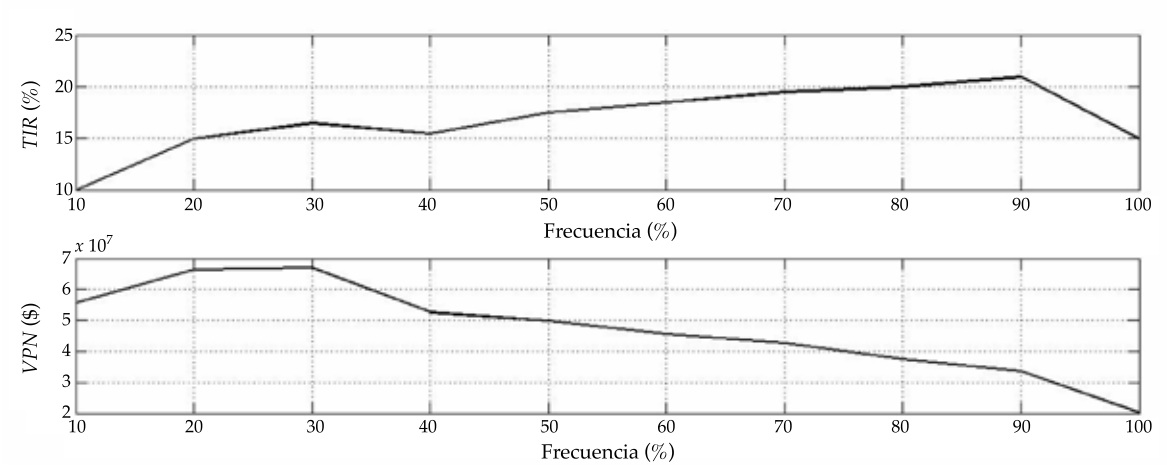

Figura 11. Rentabilidad del proyecto en el sitio 351 con código 7 749, cuenca Chontalcuatlán.

Conclusiones

La planeación global en el sector energético facilita el desarrollo de generación de energía, considerando fuentes renovables, como las pequeñas centrales hidroeléctricas al hilo de agua. La metodología presentada en este estudio pretende dar bases para la futura evaluación energética.

En específico, el modelo hidrológico *Soil Moisture Accounting* es una herramienta recomendable para conocer el caudal medio en cuencas no aforadas, siempre y cuando se tenga información confiable para realizar la calibración y validación de los parámetros que se incluyen en el modelo.

El uso del modelo requiere de cierto cuidado, pues pequeñas variaciones en los parámetros más sensibles pueden dar resultados considerablemente diferentes.

En la cuenca del río Alto Amacuzac se encontraron 578 sitios con un potencial bruto disponible de 49 227 kW. Esta cantidad representa un 33.5% de la capacidad autorizada por la Comisión Reguladora de Energía para autoabastecimiento en 2011. Es importante resaltar que esta cantidad puede variar dependiendo de los criterios considerados para elegir un sitio apropiado para la generación de energía eléctrica.

El método propuesto se puede aplicar teniendo conocimientos básicos de sistemas de información geográfica. No es necesario aprender el manejo de un *software* complejo para poder localizar los sitios factibles para construir pequeñas centrales hidroeléctricas.

En la evaluación económica realizada para los sitios disponibles, el costo aproximado de inversión (en pesos mexicanos) en una PCH es de $3,672,636.00 en promedio, y los costos estimados variaron de $86,357.00 para el caso de la PCH con menor potencial a $43,781,104.00 para la del potencial mayor encontrado.

Del estudio de factibilidad que se realizó para un caso específico se puede deducir que el Q_{90} es apropiado para el diseño de PCHs al hilo de agua de acuerdo con los resultados obtenidos de la tasa interna de retorno (TIR).

Referencias

Alemán, G. S., Casiano, V. H., Cárdenas, D. L., Díaz, R., Scarlat, N., Mahlknecht, J., Dallemand, J. F. & Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *32*, 140-153.

Aparicio, F. J. (2010). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, DF: Editorial Limusa.

APER (2007). *Hydropower and environment: Technical and operational procedures to better integrate small hydropower*

ISSN 0187-8336 •

plants in the environment (22 pp.). Milano: Associazione Produttori Energia da Fonti Rinnovabili.

Ayros, E. N., & Salazar, J. J. (2011). *Modelo probabilístico de la curva de duración de caudales para el diseño de una central hidroeléctrica*. III Congreso Nacional del Agua, Lima, Perú, 8-10 de marzo.

Bennett, T. H. (1998). *Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. Thesis (M.S.) Davis: University of California.

Bennett, T. H., & Peters, J. C. (2000). *Continuous soil moisture accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Building Partnerships*, 1, DOI: 10.1061/40517(2000)149.

Bottcher, A. B., Whiteley, B. J., James, A. I., & Hiscock, J. G. (2012). Watershed assessment model (WAM): Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, *55*(4), 1367-1383. Recovered from http://dx.doi.org/10.13031/2013.42248.

Calderón, F. R. (2017). *Fuentes alternas de energía eléctrica*. Consultado en enero de 2017. Recuperado de http://www.actiweb.es/unid_develasco/archivo4.pdf.

Castro, A. (octubre, 2006). *Minicentrales hidroeléctricas. Manuales de energías renovables* (6a ed.). Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

CFE (2017). *Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2016-2017)*. Consultado en enero de 2017. Recuperado de http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_casa.asp.

Conagua (2011). Ubicación geográfica de México ante las sequías y su vulnerabilidad. En*: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diálogos por el agua y el cambio climático: la gestión de la vulnerabilidad ante las sequías* (pp. 14-17). México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2017). *Red de estaciones climatológicas*. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Consultado en enero de 2017. Recuperado de smn1.conagua.gob.mx/climatologia/normales/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz.

ESRI (2017). *ArcGIS for Desktop: ArcMap*. Redlands, USA: Environmental Systems Research Institute, Inc. Consultado en enero de 2017. Recuperado de http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/.

Fernández, E. S. (2007). *Los proyectos de inversión: evaluación financiera*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Fritz, J. J. (1984). *Small and mini hydropower systems. Resources assessment and project feasibility*. New York: McGraw Hill.

Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (2004). *Plan de Investigación integral para la caracterización y diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos de Cantabria. Estudio de recursos hídricos. Anexo 2: Descripción y características del programa HEC-HMS*. Santander, España: Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental Universidad de Cantabria.

Hall, D. G. (2011). *Hydropower resource assessment of Brazilian streams*. Río de Janeiro: HydroVision Brasil.

IMTA (2012). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas). Actualización hasta 2006*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Comisión Nacional de Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

IMTA (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático* (148 pp.). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

INEGI (2004). Capítulo 2: Interpretación de la carta (pp. 5-10). En: *Guía para la interpretación de cartografía-Edafología*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI (2007). *Ficha técnica. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, escala 1:250 000 Serie II (Continuo Nacional)* (3 pp.). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI (2010). *Ficha técnica. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación serie IV escala 1:250 000* (1 p.). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI (2017). *Red hidrográfica escala 1:50 000 edición 2, Región hidrográfica Balsas, Cuenca río grande de Amacuzac*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consultado en enero de 2017. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/Topografia/Descarga.aspx.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. D., Harmel, R. L., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers. *Transactions of the ASABE*, *50*(3), 885-900.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part 1-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, *10*(3), 282-290.

Ortiz, F. R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas. Construcción paso a paso*. Bogotá: Ediciones de la U Conocimiento a su Alcance. Recuperado de www.edicionesdelau.com.

Osserberg (2017). *La turbina Osserberg*. Consultado en enero de 2017. Recuperado de http://www.ossberger.de/cms/es/hydro/la-turbina-ossberger/.

USACE (2017). *Software HEC-HMS*. Washington, DC: US Army Corps of Engineers. Consultado en enero de 2017. Recuperado de http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx.

UTP (2010). *Sistemas de generación de energía eléctrica: hidrología básica. Programa de ingeniería eléctrica* (pp. 1-12.). Pereira, Colombia: Universidad Autónoma de Pereira.

Dirección institucional de los autores

Mtra. Bertha Meza Prieto

Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ingeniería
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
bmezaprieto@yahoo.com

Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares

Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ingeniería
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
javieraparicio@prodigy.net.mx
francisco.aparicio@conagua.gob.mx

ISSN 0187-8336 •